乌拉特灌域土壤剖面盐分季节性分布特征

窦 旭， 史海滨， 李瑞平， 苗庆丰， 田 峰， 于丹丹， 周利颖
（内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018）

摘 要：以河套灌区下游乌拉特灌域为研究区，通过野外实测与室内试验分析相结合，采用传统统计与主成分分析方法探讨盐渍化土壤春季（4月）和秋季（10月）含盐量与盐分离子分布规律，明确影响土壤盐渍化的主导因子。结果表明：(1) 春季（4月）和秋季（10月）土壤含盐量变化范围在0.55~70.78 $g\cdot kg^{-1}$，表层土壤含盐量平均值在7 $g\cdot kg^{-1}$以上，属于中度以上盐渍化土壤，有些土壤达到盐土程度。(2) 表层土壤含盐量明显大于深层土壤，是深层的1.5~2倍，是盐分的积累层，属于盐分表聚型土壤。(3) 各层土壤阳离子以Na^+为主，占阳离子总量的47.19%，阴离子以Cl^-为主，占阴离子总量的58.86%，研究区主要受到氯化物的影响，以钠盐为主，且春季土壤盐分含量明显高于秋季。主成分分析表明，前2个主成分的累积方差贡献率为86.44%，与第一主成分密切相关的是Na^+、Cl^-、TS、Ca^{2+}、Mg^{2+}，这5个指标与土壤盐渍化关系密切，代表了土壤盐渍化状况；在第二主成分因子变量中，K^+与HCO_3^-具有较其他变量更高的载荷，K^+与HCO_3^-通过影响土壤碱度进而在一定程度上影响土壤盐渍化。

关键词：盐渍化；盐分离子；盐分含量；主成分分析；河套灌区

土壤盐渍化制约着农业可持续发展[1]，影响着干旱半干旱地区生态环境与农业高效发展[2]。河套灌区是我国重要的粮食产区，盐渍化土壤占灌溉总面积的50%以上[3]，自20世纪80年代开始，灌区通过节水灌溉技术的创新、实践和规模化应用，克服了资源禀赋的不足，充分发挥了自身的农业生产特色[4-5]。由于灌区蒸发量远远大于降雨量且地下水矿化度高，土壤盐渍化和水资源短缺是河套灌区可持续发展的关键制约因素，影响着农牧业生产[6-9]，属于干旱地区。因此明确试验区影响土壤盐渍化的主导因子，对于盐渍化土壤治理具有重要意义。

近年来，国内外有关土壤盐渍化特征以及其盐分组成等方面的研究逐渐增多[10-13]。景宇鹏等[11]对河套平原弃耕地盐渍化土壤含盐量、pH、阴阳离子组成、碱化度（ESP）的分布特征进行了分析，为改良河套平原弃耕地与区域生态环境建设提供理论依据。王巧焕等[12]针对内蒙古阿拉善盟腰坝绿洲对土壤中含盐量、各盐分离子分布进行了研究，利用主成分分析法对土壤盐渍化主导因子进行了分析，为当地盐渍化土壤的防治与改良提供了实践依据。张体彬等[14]研究表明，对于银北灌区龟裂碱土的开发与利用过程中应首先降低土壤盐度，进一步改变土壤离子组成。河套灌区有关土壤盐渍化与盐分离子组成也有一些研究[15-17]，但是相对来说比较薄弱，有待进一步研究影响灌区土壤盐渍化的主导盐分离子。

不同类型盐渍化土壤在其改良过程中的措施也有所不同，试验区主要以中重度盐渍化土壤为主，本文结合经典统计学和主成分分析两种分析方法，明确试验区土壤中盐分离子的含量，以及影响土壤盐渍化的主要因子，来综合反映土壤盐渍化的特点，揭示土壤盐分特征，为合理利用和改良河套灌区盐渍化土地资源提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

于2018年4月（春季）和10月（秋季）在乌拉特前旗暗管排水控盐综合试验区（108°37′28″~108°39′49″E，40°44′54″~40°45′49″N，海拔1017.97~1019.95 m）进行。试验区东西宽约2.39

收稿日期：2019-08-06； **修订日期**：2020-03-26
基金项目：国家自然科学基金项目（51879132，51769024）；内蒙古科技重大专项（zdzx2018059）；内蒙古水利科技重大专项（nsk2018-M5）资助
作者简介：窦旭（1994-），男，博士研究生，主要从事灌溉与排水理论技术研究. E-mail：1161927928@qq.com
通信作者：史海滨. E-mail: shi_haibin@sohu.com

km,南北长约1.7 km,总面积400 hm^2(图1)。南侧利用面积205 hm^2,大面积种植葵花、玉米,还有小部分小麦和牧草,北侧盐荒地195 hm^2,仅有杂草生长。暗管采用双层布设,管长为200 m、管径80 mm、埋深分别为60 cm、100 cm、间距分别为20 m,坡度为1‰。共布设10个地下水观测井,盐荒地和耕地各1组,东西方向间距分别为10 m、50 m、100 m、500 m,地下水位每隔10 d采集1次,地下水埋深在1.2~1.7 m,地下水矿化度约7 $g\cdot L^{-1}$。春灌时间为5月17日,采用畦灌的灌溉方式。试验区地处中温带大陆性气候区,气温多变,干燥多风,日照充足,光能丰富,降水少,蒸发强,无霜期短,多年平均气温6~8 ℃,极端最低气温-36.7 ℃,极端最高气温36.4 ℃;降雨主要集中在6—8月,占全年降雨量的70%,多年平均降雨量196~215 mm、蒸发量为2172.5 mm、无霜期130 d、风速2.5~3 $m\cdot s^{-1}$、日照时数3230.9 h、最大冻土深度为1.2 m。

1.2　试验设计与数据采集

田间布置采用100 m×100 m网格,采样点设立在网格节点处,共计150个采样点,同时设置9处垂直剖面进行土壤物理性质测试,采用土钻法采集1 m深度土壤,共5层(0~20 cm,20~40 cm,40~60 cm,60~80 cm,80~100 cm)进行土壤基础数据采集与测定(表1)。根据研究区土壤盐渍化程度、土壤质地、同时结合路网、沟渠分割情况最终确定以300 m×300 m的网格布置采样点,共42个采样点(图1),利用手持全球定位系统(GPS)定位仪测定坐标。土壤盐分离子Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+、Cl^-、CO_3^{2-}、HCO_3^-、SO_4^{2-}测定方法见表2,CO_3^{2-}在偏碱性土壤中易与Ca^{2+}、Mg^{2+}等结为沉淀,此次试验检出含量极少而并未列出

1.3　数据处理

采用Excel整理数据并制图,利用SPSS 17.0软件进行主成分分析,ArcGIS 10.5软件中利用Kriging最优内插法绘制土壤含盐量空间分布特征图。

2　结果分析

2.1　土壤盐分剖面分布特征

由表3可以看出,春季(4月)和秋季(10月)土

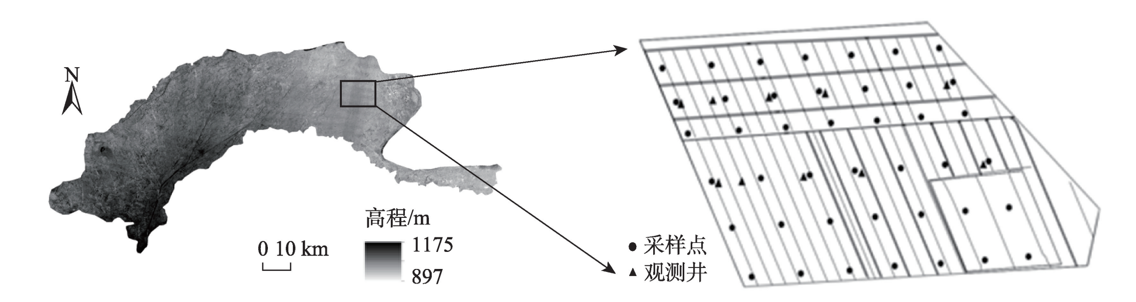


图1　研究区和采样点分布示意图

Fig. 1　Study area and sampling point distribution map

表1　试验区土壤物理性质

Tab. 1　Test area soil physical properties table

试验区	土层深度/cm	土壤容重/($g\cdot cm^{-3}$)	土壤类型	饱和含水率/%	田间持水率/%	饱和导水率/($cm\cdot s^{-1}$)
荒地	0~20	1.426~1.464	粉土	0.352~0.354	0.219~0.230	3.939×10^{-5}
	20~40	1.468~1.472	粉质壤土	0.360~0.365	0.238~0.242	3.798×10^{-5}
	40~60	1.470~1.476	粉土	0.346~0.351	0.240~0.246	1.238×10^{-5}
	60~80	1.483~1.488	粉土	0.340~0.347	0.229~0.234	2.073×10^{-5}
	80~100	1.485~1.490	粉土	0.348~0.353	0.239~0.241	5.176×10^{-5}
改良耕地	0~20	1.451~1.458	粉质壤土	0.331~0.336	0.220~0.224	1.918×10^{-4}
	20~40	1.462~1.469	粉质壤土	0.335~0.342	0.235~0.239	4.639×10^{-5}
	40~60	1.463~1.470	粉质壤土	0.332~0.340	0.240~0.250	4.753×10^{-5}
	60~80	1.470~1.479	粉质壤土	0.342~0.349	0.231~0.238	1.769×10^{-5}
	80~100	1.480~1.483	粉质壤土	0.350~0.360	0.220~0.223	2.800×10^{-4}

表2 土壤盐分离子测定方法

Tab. 2 Method for determining soil salt-based ions

盐分离子	测定方法
Mg^{2+}、Ca^{2+}	EDTA滴定法
Na^{+}、K^{+}	火焰光度计法
HCO_3^-、CO_3^{2-}	双指示剂中和滴定法
Cl^-	硝酸银滴定法
SO_4^{2-}	比浊法

壤含盐量变化范围在0.55~70.78 $g\cdot kg^{-1}$，表层土壤平均值在7 $g\cdot kg^{-1}$以上，属于中、重度盐渍化土壤，有些土壤达到盐土程度[18]。表层土壤含盐量明显大于深层土壤，是盐分的积累层，表层含盐量大约是深层的1.5~2倍，属于盐分表聚型土壤，其主要受河套灌区蒸发强烈，气温高，降雨少等自然因素的影响，加之试验区北侧盐荒地无灌溉淋洗，由于灌区长期持续强烈的蒸发作用，包气带毛细水上升把深层土壤以及地下水中的盐分带到土壤表层，致使地表盐分升高，在地表形成高盐分聚积区，同时这也与试验区地下水位较高有着密切的联系，也是导致次生盐渍化的主要原因。从时间变化来看，春季表层土壤含盐量明显高于秋季，深层土壤含盐量无显著变化，春季属于积盐状态，秋季属于脱盐状态。

春季各层土壤变异系数在116.837%～150.826%，均大于100%，属于强变异性。秋季各层土壤变异系数在80.924%～99.684%，位于10%～100%，属于中等变异性。春季土壤含盐量的空间异质性强于秋季；受地势、气候和人为等因素的影响土壤盐分运移也随之变化，随着土层深度的增加土壤盐分受这些因素的影响减弱，变异强度随之降低，说明试验区含盐量的分布不均匀，呈较强的空间异质性。

由图2、图3可知，土壤含盐量主要集中在研究区北侧盐荒地，南侧改良耕地盐分相对较低，春季与秋季各层土壤含盐量分布特征相似，造成这种现象的主要原因是研究区北侧盐荒地地势低，地下水埋深较浅，南侧改良耕地经过灌溉淋洗，盐分通过深层渗漏或水平运移到荒地土壤中，荒地盐分逐渐增多。

2.2 土壤盐分离子分布特征

由图4可知，各层土壤阳离子以Na^+为主，占阳离子总量的47.19%，其次是Mg^{2+}和Ca^{2+}，分别占阳离子的25.94%和21.99%，K^+含量最少，仅占阳离子总量的4.88%；土壤阴离子以Cl^-为主，占阴离子总量的58.86%，HCO_3^-和SO_4^{2-}次之，占阴离子总量的15.57%和25.57%，试验区含盐量主要以氯化物为主，氯化物主要以钠盐为主；0～20 cm土层离子含量均高于20～40 cm，盐分离子表聚现象严重；从时间变化来看，春季表层土壤盐分离子含量明显高于秋季。

从土壤剖面离子变异系数来看，阳离子中K^+和Na^+变异系数相对较小，在44.45%～97.02%，具有中等变异性，Ca^{2+}和Mg^{2+}变异系数相对较大，在86.81%～121.43%，具有较强变异性，说明Ca^{2+}和Mg^{2+}的空间依赖性强于K^+和Na^+。阴离子中Cl^-变异系数相对较大，在103.69%～117.97%，均大于100%，属于强变异性，Cl^-在春季和秋季分布不均匀，HCO_3^-和SO_4^{2-}变异系数相对较小，在30.33%～67.67%，位于10%～100%之间，属于中等变异性。

表3 各层土壤含盐量统计特征

Tab. 3 Statistical characteristics of soil total salt in each layer

季节	土层深度/cm	样本数	最小值/($g\cdot kg^{-1}$)	最大值/($g\cdot kg^{-1}$)	平均值/($g\cdot kg^{-1}$)	标准差	变异系数/%	偏度系数	峰度系数
春季	0~20	42	2.120	70.780	14.583	21.995	150.826	1.723	1.499
	20~40	42	2.060	55.940	9.111	13.371	146.768	2.478	5.861
	40~60	42	0.660	32.140	6.738	8.460	125.546	1.635	1.725
	60~80	42	0.550	27.170	6.435	7.519	116.837	1.365	0.661
	80-100	42	0.740	25.290	5.417	6.428	118.664	1.647	1.937
秋季	0-20	42	0.600	35.300	11.470	11.434	99.684	0.670	-1.246
	20-40	42	0.900	26.400	7.233	6.492	89.748	1.039	0.710
	40-60	42	1.000	21.200	6.338	5.331	84.110	1.010	0.314
	60-80	42	0.800	20.200	6.613	5.740	86.800	0.936	-0.229
	80-100	42	0.900	15.800	5.720	4.629	80.924	0.734	-0.724

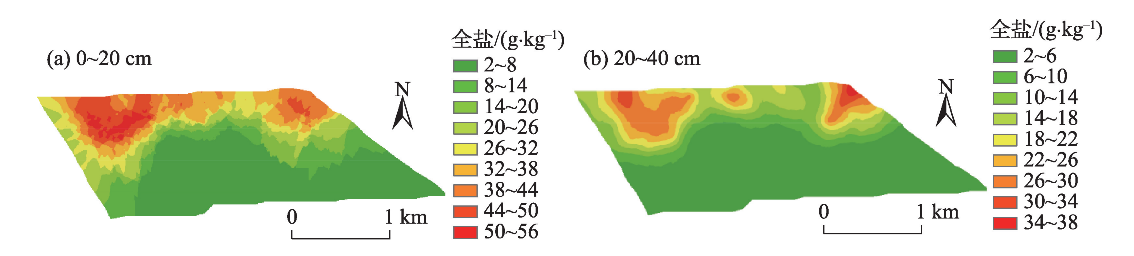


图2　春季表层土壤含盐量空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of total salt in the surface soil in spring

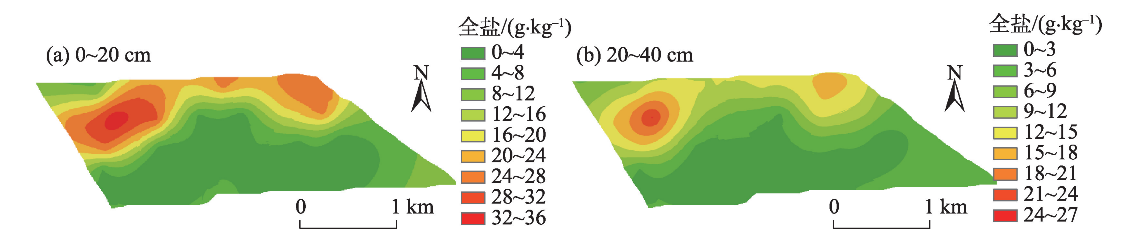


图3　秋季表层土壤含盐量空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of total salt in the surface soil in autumn

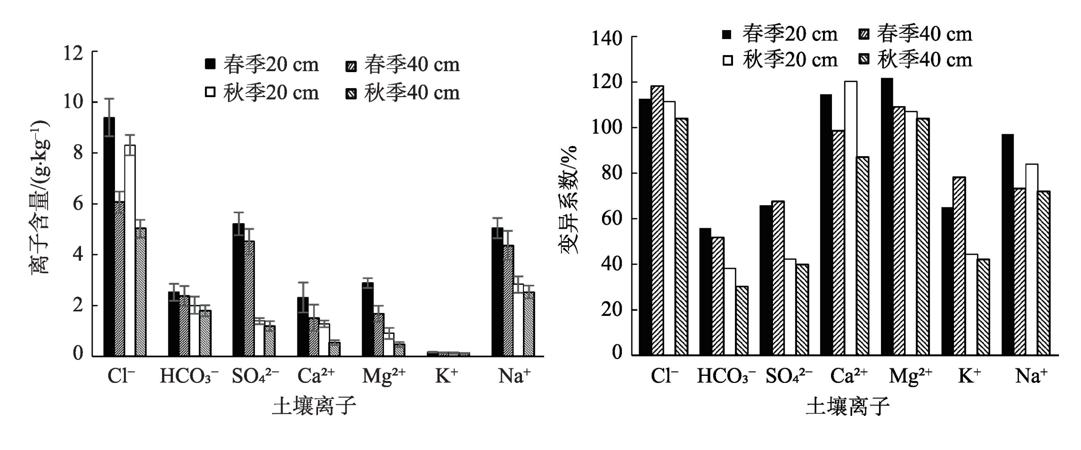


图4　土壤主要离子及其在土壤剖面分布

Fig. 4　Main ions in soil and their distribution characteristics in soil profile

从时间变化来看,春季土壤剖面各盐分离子变异系数均大于秋季,春季盐分离子空间异质性相对较强。

2.3　土壤盐渍化的主导因子

土壤含盐量和土壤各种可溶性离子空间变异性较强,对土壤含盐量与各盐分离子的分布特征及其影响土壤盐渍化的因素难以确定,采用主成分分析方法对土壤中Cl^-、HCO_3^-、SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+和盐分含量(TS)8个变量进行分析,构建具有代表性的综合因子,并且对试验区土壤盐渍化状况进行综合评价,计算主成分与各项指标的相关系数,按照累计贡献率>85%、特征值>1来确定主成分个数。结果表明(表4):前2个因子的特征值均>1,特征值分别为5.682、1.233,所对应的方差贡献率分别为71.03%、15.41%,累计方差贡献率86.44%,故前2个主成分能很好地解释了原8个变量中的绝大部分信息。

主成分因子载荷是主成分因子与原始变量因子之间的相关系数,一般认为因子负荷越大,变量在相应主成分中的权重就越大[19-20]。从主成分载荷矩阵(表5)来看,与第一主成分密切相关的是Na^+、

表4　主成分分析的特征值与方差贡献率

Tab. 4　Characteristic root and variance contribution rate of principal component analysis

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	5.682	71.03	71.03
2	1.233	15.41	86.44

表5 主成分因子的荷载矩阵与得分系数矩阵

Tab. 5 Loadmatrix and scoring coefficient matrix of principal component factor

	因子荷载矩阵		成分得分矩阵	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Cl^-	0.969	0.028	0.171	0.022
HCO_3^-	−0.523	0.723	−0.092	0.586
SO_4^{2-}	0.784	−0.18	0.138	−0.146
Ca^{2+}	0.928	0.159	0.163	0.129
Mg^{2+}	0.965	0.038	0.17	0.031
K^+	0.418	0.806	0.074	0.654
Na^+	0.979	−0.016	0.172	−0.013
TS	0.964	−0.015	0.17	−0.012

Cl^-、TS、Ca^{2+}、Mg^{2+}，这5个指标与土壤盐渍化关系密切，代表了土壤盐渍化状况，说明影响该区土壤盐渍化的盐分主要是氯化物，并且以钠盐为主。此外，SO_4^{2-}也在第一主成分的因子变量中具有较高的正载荷。故第一主成分替代了8个原始因子中的Na^+、Cl^-、TS、Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-}6个因子的作用。在第二主成分因子变量中，K^+与HCO_3^-具有较其他变量更高的载荷，呈正相关。说明该主成分在第一主成分的基础上通过影响土壤碱度进一步反映出该区土壤盐渍化，第二主成分替代了8个原始因子中K^+与HCO_3^-2个因子的作用。因此，根据各指标与各主成分间的相关性显著程度，可将TS、Na^+、Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}作为研究区土壤盐渍化的主要特征因子。根据分析所得的各变量在相应主成分上的因子负荷，求得各主成分的特征向量，将主成分用8个指标向量的线性组合表示，可分别获得各主成分的函数表达式：

$$PC1 = 2.310Cl^- - 1.247HCO_3^- + 1.869SO_4^{2-} + 2.212Ca^{2+} + 2.3Mg^{2+} + 0.996K^+ + 2.334Na^+ + 2.298TS$$

$$PC2 = 0.031Cl^- + 0.803HCO_3^- - 0.2SO_4^{2-} + 0.177Ca^{2+} + 0.042Mg^{2+} + 0.895K^+ - 0.018Na^+ - 0.017TS$$

2.4 地下水埋深对土壤盐分的影响

在河套灌区，盐分本身对土壤水分有较强的亲和力，受河套灌区降雨远远小于蒸发量的影响，地下水埋深越浅，土壤积盐越严重，地下水埋深较深的区域土壤盐分含量相对较低。由图5可知，表层土壤(0~20 cm)盐分异常高于其他土层。试验区地下水埋深与土壤盐分符合线性关系，R^2>0.9103，拟合效果良好。0~20 cm土壤盐分变化随着地下水埋深变化趋势较大，20~40 cm、40~100 cm土壤盐分随着地下水埋深变化趋势较小。因此，地下水埋深对土壤盐分有着较大的影响，控制地下水位、降低土壤盐分，研究地下水埋深与土壤盐分之间的关系，保证作物正常生长，防治因蒸发而导致土壤盐渍化具有重要意义。

3 讨 论

土壤含盐量和盐分离子组成反映了土壤盐渍化程度，也是改良和利用盐渍化土壤的重要依据。土壤盐分离子组成不同导致土壤盐渍化类型不同，对土壤盐分运移和理化性质也起着重要作用，并且

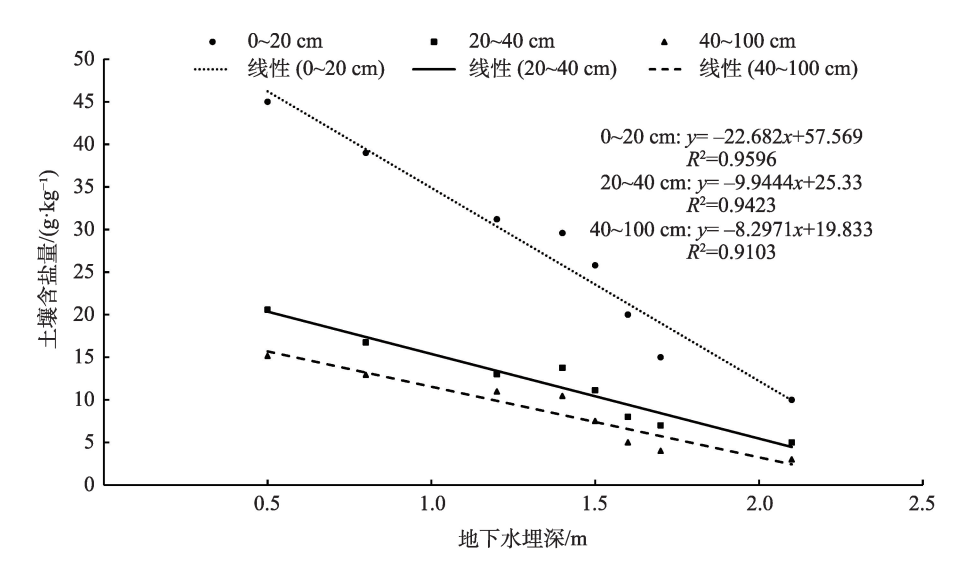


图5 地下水埋深与土壤盐分的关系

Fig. 5 Relationship between groundwater depth and soil salinity

决定着土壤脱盐的难易程度。此外,由于盐分离子化学元素的离子半径、化合价以及存在形态等的相似性,因此,其在土壤中运移、沉淀等也存在一定的相关性[21]。内蒙古河套灌区近年来大力发展中高标准农田,导致土壤农田水盐状态改变,土壤次生盐渍化问题凸显,了解土壤盐分组成以及运移规律,科学合理的改良盐渍化土壤是河套灌区亟待解决的问题。因此,已有很多学者对河套灌区水盐运移及其盐分组成进行了大量研究。孙亚楠等[15]以河套灌区永济灌域盐渍化土壤为研究对象,通过构建SVM综合模型,很好的预测土壤含盐量。李亮等[17]通过研究河套灌区耕荒地间水盐运移规律,研究表明耕地受农业措施和灌溉水淋洗的影响,盐分通过深层渗漏或水平运移到荒地土壤中,荒地的盐分逐渐增加并且反侵蚀耕地,形成动态平衡;这与本试验区相似,试验区北侧为盐荒地,南侧为改良耕地,且地势南高北低,经过日积月累的影响,盐分由耕地向荒地运移,导致荒地盐分不断增加,荒地盐分影响着改良耕地作物生长,形成盐分动态平衡。随着暗管排水技术越来越成熟,以及在河套灌区的大力推广,试验区利用暗管排水技术治理和改良盐荒地,可以控制地下水埋深,降低土壤盐分含量,但是长期大规模使用暗管排水肯定还会导致一些新的农业环境问题,还有待进一步加强研究。

土壤盐渍化的改良与利用是一个复杂的过程,影响因素也相对较多,为了能充分的考虑各种因素对土壤的作用与影响,需要将所有可能有联系的变量都考虑进来,但是随着变量的增多分析过程也相对较复杂,难以确定影响结果的本质因素。主成分分析就是从相对较多的变量中抽取出少数互不相关的综合因子的一种多元统计方法,这几个少数的综合因子对研究结论做出合理科学的解释[19,22],近年来,有较多的学者利用该方法对土壤盐渍化的影响因素、类型、以及分布特征进行研究。吕真真等[23]利用此方法对新疆玛纳斯河流域土壤盐渍化的主要因子进行了分析,为该地区土壤资源可持续利用提供重要的理论依据。刘迁迁等[24]利用此方法研究了察南灌区影响土壤盐分特征的主导因子是HCO_3^-、Cl^-和K^+。官会林等[25]利用此方法探索了香石竹设施栽培土壤盐害的防治方法与技术途径,结果表明:盐害防治重点在于SO_4^{2-}、NO_3^-、Ca^{2+},对指导香石竹设施栽培土壤管理与持续利用具有重要意义。与以上学者研究相比,本研究选择了土壤含盐量、阴阳离子组成等8个指标作为土壤盐渍化参数,能客观地代表区域土壤盐渍化特征的总体情况。

4　结 论

(1) 春季(4月)和秋季(10月)土壤含盐量变化范围在0.55~70.78 g·kg^{-1};表层土壤含盐量明显大于深层土壤,是盐分的积累层,表层含盐量大约是深层的1.5~2倍,属于盐分表聚型土壤,春季表层土壤含盐量明显高于秋季。春季各层土壤变异系数在116.837%~150.826%,均大于100%,属于强变异性。秋季各层土壤变异系数在80.924%~99.684%,位于10%~100%,属于中等变异性,春季土壤含盐量的空间异质性强于秋季。

(2) 各层土壤阳离子以Na^+为主,土壤阴离子以Cl^-为主。阳离子中K^+和Na^+变异系数相对较小,在44.45%~97.02%,具有中等的变异性,Ca^{2+}和Mg^{2+}变异系数相对较大,在86.81%~121.43%,具有较强变异性,说明Ca^{2+}和Mg^{2+}的空间依赖性强于K^+和Na^+。阴离子中Cl^-变异系数相对较大,在103.69%~117.97%,属于强变异性,HCO_3^-和SO_4^{2-}变异系数相对较小,在30.335%~67.67%,属于中等变异性,说明Cl^-在春季和秋季分布不均匀;春季土壤剖面各盐分离子变异系数均大于秋季。

(3) 主成分分析表明,前2个主成分的累积方差贡献率为86.44%,与第一主成分密切相关的是Na^+、Cl^-、TS、Ca^{2+}、Mg^{2+},这5个指标与土壤盐渍化关系密切,代表了土壤盐渍化状况;在第二主成分因子变量中,K^+与HCO_3^-具有较其他变量更高的载荷,K^+与HCO_3^-通过影响土壤碱度进而在一定程度上影响土壤盐渍化,降低土壤盐渍化程度,采取适当的方法减少土壤中的Na^+、Cl^-、Mg^{2+}和Ca^{2+}。

参考文献(References):

[1] 李春轩. 新疆玛纳斯河绿洲土壤盐渍化空间分布特征研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012. [Li Chunxuan. Spatial Distribution Characteristics of Soil Salinization in Manas River Oasis, Xinjiang[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2012.]

[2] 徐恒刚. 中国盐生植被及盐渍化生态治理[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004. [Xu Henggang. Chinese Halophyte Vege-

tation and Salinization Ecological Management[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004.]

[3] 徐昭, 史海滨, 李仙岳, 等. 不同程度盐渍化农田下玉米产量对水氮调控的响应[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 334-343. [Xu Zhao, Shi Haibin, Li Xianyue, et al. Response of maize yield to irrigation and nitrogen rate in three salinization farmlands[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 334-343.]

[4] 李彬, 史海滨, 妥德宝, 等. 节水改造前后土壤盐分剖面特征及其空间分布——以内蒙古河套灌区中游临河区为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 663-673. [Li Bin, Shi Haibin, Tuo Debao, et al. Soil salinity profile characteristics and its spatial distribution-before and after water saving: Taking the middle reach in Hetao irrigation district of Inner Mongolia as an example[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 663-673.]

[5] 李彬, 史海滨, 张建国, 等. 节水改造前后内蒙古河套灌区地下水水化学特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 99-110. [Li Bin, Shi Haibin, Zhang Jianguo, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater before and after water-saving reform in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 99-110.]

[6] Xue J, Ren L. Evaluation of crop water productivity under sprinkler irrigation regime using a distributed agro-hydrological model in an irrigation district of China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 178: 350-365.

[7] 童文杰. 河套灌区作物耐盐性评价及种植制度优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. [Tong Wenjie. Study on Salt Tolerance of Crops and Cropping System Optimization in Hetao Irrigation District[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.]

[8] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1202-1210. [Guan Xiaoyan, Wang Shaoli, Gao Zhanyi, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1202-1210.]

[9] 李文宝, 李畅游, 贾德彬, 等. 内蒙古中部夏季大气降水中同位素变化[J]. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1214-1221. [Li Wenbao, Li Changyou, Jia Debin, et al. Change of stable isotopes in summer precipitation in central Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(6): 1214-1221.]

[10] 窦旭, 史海滨, 苗庆丰, 等. 盐渍化灌区土壤水盐时空变异特征分析及地下水埋深对盐分的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 246-253. [Dou Xu, Shi Haibin, Miao Qingfeng, et al. Temporal and spatial variability analysis of soil water and salt in salinized irrigation area and influence of groundwater depth on salt[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 246-253.]

[11] 景宇鹏, 段玉, 妥德宝, 等. 河套平原弃耕地土壤盐碱化特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1410-1420. [Jing Yupeng, Duan Yu, TuoDebao, et al. Characteristics of salinization of deserted farmland in Hetao Plain, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(6): 1410-1420.]

[12] 王巧焕, 卢玉东, 赛佳美, 等. 干旱区绿洲土壤盐分特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 503-509. [Wang Qiaohuan, Lu Yudong, Sai Jiamei, et al. Characteristics of soil salinity in arid oasis[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(3): 503-509.]

[13] Navarro-Pedreño J, Jordan M M, Meléndez-Pastor I, et al. Estimation of soil salinity in semi-arid land using a geostatistical model[J]. Land Degradation & Development, 2010, 18(3): 339-353.

[14] 张体彬, 康跃虎, 胡伟, 等. 基于主成分分析的宁夏银北地区龟裂碱土盐分特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 39-46. [Zhang Tibin, Kang Yuehu, Hu Wei, et al. Studies on salinity characteristics of takyric solonetz in Ningxia Yinbei region based on principal component analysis[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(2): 39-46.]

[15] 孙亚楠, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区土壤水溶性盐基离子高光谱综合反演模型[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 344-355. [Sun Yanan, Li Xianyue, Shi Haibin, et al. Hyperspectral integrated inverse model for water-soluble salt ions content in Hetao irrigation district[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 344-355.]

[16] 刘景双, 朱颜明. 长白山岳桦林化学元素生物地球化学分析[J]. 地理科学, 1998, 18(5): 457-462. [Liu Jingshuang, Zhu Yanming. Analysis of biological geochemistry of chemical elements in *Betula ermanii* forest, Changbai Mountain[J]. Scientia Geographica Sinica, 1998, 18(5): 457-462.]

[17] 李亮, 李美艳, 张军军, 等. 基于HYDRUS-2D模型模拟耕荒地水盐运移规律[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 66-71. [Li Liang, Li Meiyan, Zhang Junjun, et al. The moving rule of salt and water in cultivated land and saline wasteland based on HYDRUS-2D model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 66-71.]

[18] 李瑞平. 冻融土壤水热盐运移规律及其SHAW模型模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007. [Li Ruiping. Study on Soil Water-Heat-Salt Transfer during Freezing-Thawing and Its Simulation by SHAW Model[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2007.]

[19] 赵益新, 赵珂, 沈庆航, 等. 多因素主成分分析及其在生态环境研究中的应用[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2008, 34(2): 203-206. [Zhao Yixin, Zhao Ke, Shen Qinghang, et al. Multifactor principal components analysis and its application in study of ecological environment[J]. Journal of Southwest University for Nationalities(Natural Science Edition), 2008, 34(2): 203-206.]

[20] 王慧敏, 郝祥云, 朱仲元. 基于干旱指数与主成分分析的干旱评价——以锡林河流域为例[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 95-103. [Wang Huimin, Hao Xiangyun, Zhu Zhongyuan. Drought assessment based on drought index and principal component analysis: A cased study in the Xilin River Basin[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 95-103.]

[21] 邱莉萍, 刘军, 王益权, 等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 277−280. [Qiu Liping, Liu Jun, Wang Yiquan, et al. Research on relationship between soil enzyme activities and soil fertility[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 277−280.]

[22] 樊家琨. 应用多元分析[M]. 开封: 河南大学出版社, 1993. [Fan Jiakun. Applied Multivariate Analysis[M]. Kaifeng: Henan University Press, 1993.]

[23] 吕真真, 刘广明, 杨劲松, 等. 新疆玛纳斯河流域土壤盐分特征研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 289−295. [Lyu Zhenzhen, Liu Guangming, Yang Jinsong, et al. Soil salinity characteristics of Manas River valley in Xinjiang[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(2): 289−295.]

[24] 刘迁迁, 苏里坦, 刘广明, 等. 新疆伊犁察南灌区土壤盐分特征[J]. 土壤, 2017, 49(5): 146−151. [Liu Qianqian, Su Lidan, Liu Guangming, et al. Characteristics of soil salinity in Chanan irrigation area, Ili of Xinjiang[J]. Soils, 2017, 49(5): 146−151.]

[25] 官会林, 孙世中, 郭云周, 等. 香石竹设施栽培土壤可溶性盐分主成分分析[J]. 土壤, 2011, 43(5): 817−821. [Guan Huilin, Sun Shizhong, Guo Yunzhou, et al. Principal component analysis of soil soluble salt contents of carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) facilities cultivation[J]. Soils, 2011, 43(5): 817−821.]

The analysis of the seasonal distribution characteristics of soil salinity in the Wulat irrigation area

DOU Xu, SHI Hai-bin, LI Rui-ping, MIAO Qing-feng, TIAN Feng, YU Dan-dan, ZHOU Li-ying

(*College of Water Conservancy and Civil Engineer, Inner Mongolia agriculture university, Hohhot* 010018*, Inner Mongolia, China*)

Abstract: To solve the salinization of soil in a salinized irrigation area, the Wulate irrigation area was selected as the research area, which is located downstream of the Hetao irrigation area. On the basis of field measurement and laboratory test analysis, traditional statistics and principal component analysis methods were used to study the salt content and ion distribution of saline soil in spring(April) and autumn(October) and to determine the major factors affecting soil salinization. The results showed that soil salt content in spring (April) and autumn (October) ranged from 0.55 to 70.78 $g \cdot kg^{-1}$ and the average salt content of surface soil was more than 7 $g \cdot kg^{-1}$, which belongs to moderate and severe salinization soil, some of which reach the level of salt soil. The salt content of the surface soil was obviously higher than that of the deep soil, which was the accumulation layer of salt. The salt content in the surface layer is about 1.5−2 times that in the deep layer, which was the typical salt accumulation type soil. The soil cations in each soil layer were mainly Na^+, which accounted for 47.19% of the total cations. The anions are mainly Cl^-, which accounted for 58.86% of the total anions. The study area was mainly affected by chlorides(NaCl), and the soil salt content in spring is higher than that in autumn. The principal component analysis showed that the cumulative variance contribution rate of the first two principal components was 86.44%, and Na^+, Cl^-, TS, Ca^{2+}, and Mg^{2+} were closely related to the first principal component. These five indicators were closely related to soil salinization and could therefore reflect soil salinization status. Among the second principal component factor variables, the loads of K^+ and HCO_3^- were higher than that of other variables. K^+ and HCO_3^- affected soil salinization to a certain extent by affecting soil alkalinity.

Keywords: salinization; salt ions; total salt; principal component analysis; Hetao irrigation area